

Studi Keandalan Struktur Anjungan Lepas Pantai Tipe *Brace Monopod*

Ricky L. Tawekal¹⁾

Aria R. Baskara²⁾

Ricky Adriadi³⁾

Abstrak

Standard API RP2A – LRFD dikembangkan berdasarkan kondisi lingkungan di Teluk Meksiko. Karena itu, penggunaan standard tersebut di Indonesia akan menghasilkan desain struktur yang berlebih karena kondisi lingkungan di Indonesia lebih tenang dibandingkan kondisi lingkungan di Teluk Meksiko.

Dalam makalah ini, sebuah model struktur anjungan lepas pantai tipe brace monopod digunakan untuk mempelajari angka keandalannya dan untuk menentukan faktor beban yang sesuai dengan kondisi lingkungan di perairan Sumatera Tenggara. Struktur tersebut didesain berdasarkan standard API RP2A – WSD. Hasil studi menunjukkan bahwa struktur memiliki angka keandalan yang melampaui kebutuhan minimum dan, berdasarkan angka keandalan yang sama, faktor beban lingkungan yang digunakan seharusnya lebih kecil dari yang ditentukan dalam API RP2A – LRFD.

Kata-kata kunci : Keandalan struktur, LRFD, struktur lepas pantai.

Abstract

API RP2A –LRFD standard was developed based on Gulf of Mexico environment. Therefore, application of the standard in Indonesia will result in an over designed structure since the environment in Indonesia is less severe compare to the environment in Gulf of Mexico.

In this paper, a model of a brace monopod platform is used to study the reliability index of the structure and to determine the environmental load factors based on environmental condition at South East Sumatera Area. The structure was designed based on API RP2A – WSD standard. The result shows that the reliability index of the structure is exceeding the minimum requirement and, by using the same reliability index, the environmental loading factors shall be less then those determined in API RP2A – LRFD.

Keywords : Structural reliability, LRFD, offshore platform

1. Latar Belakang

Indonesia yang merupakan salah satu penghasil minyak bumi dan gas alam dunia mempunyai ratusan anjungan lepas pantai yang tersebar di seluruh wilayah perairan Indonesia. Sebagian besar dari anjungan lepas pantai yang ada, umumnya berjenis tetap (*fixed offshore platform*) karena perairan di Indonesia memiliki kedalaman yang tidak begitu besar.

Dalam perencanaan struktur anjungan lepas pantai, faktor keamanan dan ekonomi menjadi bagian yang penting dan harus dipertimbangkan. Sehingga suatu sistem struktur anjungan lepas pantai didesain agar dapat menjamin suatu margin keamanan yang

memadai dan dapat diterima terhadap kemungkinan gagal sepanjang umur layannya.

Konsep faktor keamanan klasik seperti WSD (*Working Stress Design*) menghasilkan desain sistem struktur anjungan dengan keandalan tinggi tanpa mempertimbangkan ketidakpastian dan sifat probabilitas di dalam tahanan maupun efek bebannya secara eksplisit. Untuk itu perlu dilakukan upaya-upaya pengembangan desain yang mempertimbangkan sifat probabilitas dari tahanan maupun beban yang bekerja pada struktur.

Upaya pengembangan ini menghasilkan sebuah format desain LRFD (*Load and Resistance Factor Design*)

1. Staf Pengajar Program Studi Teknik Kelautan - ITB
2. Structural Engineer – CNOOC SES
3. Alumni Program Studi Teknik Kelautan - ITB

Catatan : Usulan makalah dikirimkan pada 28 Desember 2004 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 13 Januari 2005 - 28 Januari 2005. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 24 Januari 2005 hingga 31 Januari 2005.

yang menggunakan analisis keandalan berdasarkan pendekatan faktor tahanan-beban. Dimana beban dan tahanan keduanya memiliki sifat variabel yang tidak pasti, akibatnya faktor keamanan juga menjadi suatu variabel yang mengandung ketidakpastian.

Keandalan adalah suatu kriteria keyakinan bahwa komponen sistem akan mampu melaksanakan fungsinya dengan aman. Angka keandalan bertujuan memberikan antisipasi karena keberadaan ketidakpastian dalam parameter desain. Konsep angka keandalan adalah membandingkan secara langsung besarnya tahanan (R) terhadap beban (S). Dimana kedua variabel tersebut adalah besaran yang bersifat acak. Nilai dari angka keandalan sangat bergantung pada distribusi yang diasumsikan.

Untuk struktur anjungan lepas pantai, API RP2A mengembangkan konsep LRFD dan menghasilkan rekomendasi kombinasi pembebanan untuk analisis struktur anjungan lepas pantai. Namun, dalam penggunaannya di Indonesia harus dikaji kembali dan dilakukan penyesuaian karena konsep API RP2A - LRFD dikembangkan berdasarkan kondisi di Teluk Meksiko yang berbeda dengan kondisi perairan di Indonesia pada umumnya. Karena itu, *load factor* untuk beban lingkungan harus disesuaikan untuk digunakan di perairan Indonesia dimana parameter statistik dari kondisi perairan di Indonesia berbeda dengan Teluk Meksiko. Adapun *load factor* untuk beban mati, beban hidup dan *equipment* tetap digunakan rekomendasi dari API RP2A-LRFD, dengan asumsi bahwa perilaku statistik dari beban-beban tersebut di setiap lokasi akan sama sehingga tidak perlu dilakukan penyesuaian.

Kajian dalam makalah ini dilakukan dengan mengambil sampel dari struktur anjungan lepas pantai tipe *brace monopod* (Lita-A) yang terletak di perairan sebelah tenggara pulau Sumatera. Perhitungan angka keandalan dan faktor beban lingkungan dilakukan berdasarkan *member* yang paling awal mencapai kondisi plastis yang dapat diketahui dengan melakukan analisis *pushed over* pada struktur dengan menggunakan software SACS (Structural Analysis Computer System).

2. Teori Keandalan Struktur

Angka keandalan bertujuan memberikan antisipasi karena keberadaan ketidakpastian dalam parameter desain. Konsep angka keandalan adalah membandingkan secara langsung besarnya tahanan (R) terhadap beban (S). Dimana kedua variabel tersebut adalah besaran yang bersifat acak. Nilai dari angka keandalan sangat bergantung pada distribusi yang diasumsikan.

Angka keandalan tidak dimaksudkan untuk menghubungkan secara langsung kemungkinan kegagalan, tapi secara kualitatif dapat digunakan untuk menunjukkan ukuran keandalan. Umumnya data hasil eksperimen cenderung berdistribusi lognormal untuk beban dan tahanan [Ingor Scharf, Birger Efferdahl dan Trond Monshaugen, 1999].

Model desain keandalan struktur dapat mendefinisikan beban dan tahanan sebagai probabilitas variabel acak. **Gambar 1** menunjukkan bahwa formulasi keandalan struktur bergantung pada tingkat overlap (beririsan) fungsi kerapatan probabilitas antara beban dan tahanan. Dari **Gambar 1**, juga diketahui bahwa tidak ada daerah yang bebas resiko.

**Gambar 1. Grafik fungsi kerapatan probabilitas terhadap tahanan dan beban
(Sumber : API RP2A – LRFD)**

Tabel 1. Hubungan antara β dengan P_f

β	P_f
2.33	0.01000
2.58	0.00500
2.88	0.00200
3.09	0.00100
3.29	0.00050
3.54	0.00020
3.72	0.00010
3.89	0.00005
4.13	0.00002
4.27	0.00001

Hubungan antara probabilitas kegagalan (P_f) dengan angka kehandalan adalah tetap, dan tidak bergantung pada tipe fungsi distribusi probabilitas. Hubungan antara angka kehandalan (β) dengan probabilitas kegagalan (P_f) ditunjukkan dalam **Tabel 1** di atas.

Besarnya resiko yang dapat diterima untuk struktur anjungan akan berbeda untuk kategori *life safety* anjungan dan konsekuensi kegagalannya. Besarnya resiko yang dapat diterima untuk suatu jenis anjungan disajikan dalam **Tabel 2**.

Ada 3 kategori konsekuensi kegagalan, yaitu :

1. Kategori konsekuensi tinggi yaitu anjungan dengan produksi tinggi dan tetap beroperasi selama kejadian alam dengan keberadaan operator (*manned*). Bentuk anjungan ini umumnya besar.
2. Kategori konsekuensi rendah yaitu anjungan dengan produksi minimal dan tingkat resiko yang rendah terhadap lingkungan tanpa keberadaan operator (*unmanned*).
3. Kategori konsekuensi moderat, yaitu anjungan anjungan dengan tingkat resiko diantara keduanya.

Bentuk pemodelan distribusi probabilitas dengan suatu fungsi digunakan untuk menyatakan suatu populasi dari suatu sampel data yang dapat mendefinisikan harga probabilitas untuk setiap harga variabel acak.

Setiap fungsi probabilitas memiliki satu atau lebih parameter fungsi yang diperoleh secara statistik dari suatu sampel data. Setiap harga parameter fungsi akan mempengaruhi bentuk distribusi.

Dalam beberapa kasus analisa fenomena alam, penentuan besarnya parameter statistik dari suatu fungsi distribusi tidak sama dengan kenyataan yang sebenarnya, hal ini disebabkan oleh keterbatasan data. Oleh sebab itu semakin banyak data yang diamati, maka kesalahan suatu fungsi distribusi akan berkurang.

3. Metoda Analisis Kehandalan

3.1 Semi probabilistic method (level I)

Metode semi probabilistik merupakan level pertama dalam analisis kehandalan struktur. Walaupun pada dasarnya metode ini tidak terlalu teliti, namun dianggap memadai untuk digunakan sebagai pengantar analisis untuk level yang lebih tinggi. Metode ini mengacu pada aturan LRFD, dimana komponen struktur dikatakan aman bila hubungan berikut ini terpenuhi,

$$\phi.R_n \geq \sum \gamma_i L_i \quad (1)$$

dimana : ϕ = faktor tahanan

R_n = tahanan nominal

γ_i = faktor beban ke- i

L_i = Beban ke- i

Untuk Tahanan dan Beban Distribusi Normal, formulasinya adalah sebagai berikut :

$$g(R,S) = R - S$$

dimana : $g(R,S)$ = fungsi unjuk kerja, $S=D+L$ adalah pengaruh beban luar (untuk sementara hanya dibatasi pada pengaruh beban mati (D) dan beban hidup (L)), R =Tahanan

Karena R,D,L diasumsikan terdistribusi normal, maka $g(R,S)$ juga normal, seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**.

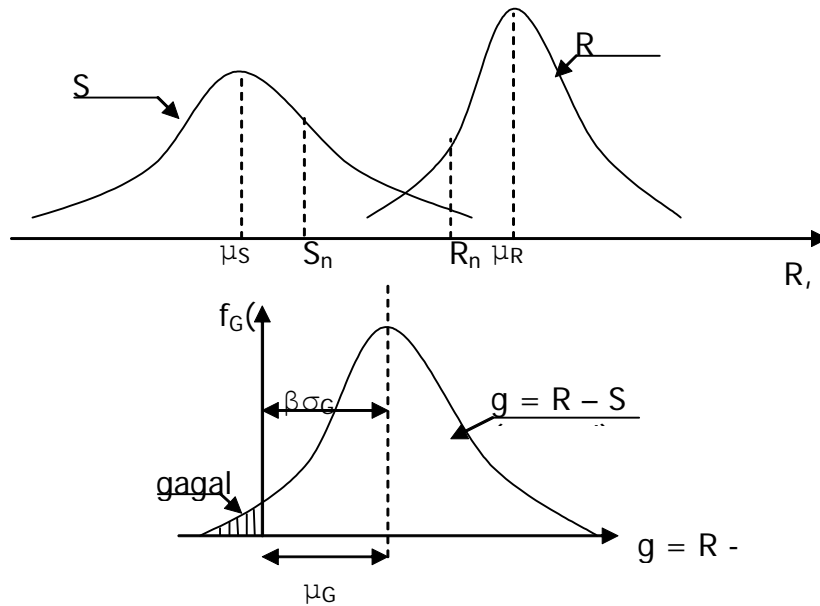
Koefisien variasi : $V = \frac{\sigma}{\mu}$

Angka kehandalan : $\beta = V^{-1} = \frac{\mu}{\sigma}$

Tabel 2. Resiko yang dapat diterima untuk suatu jenis anjungan

Kategori Life Safety	Kategori Konsekuensi Kegagalan		
	High Consequence of Failure (C-1)	Medium Consequence of Failure (C-2)	Low Consequence of Failure (C-3)
Manned non-Evacuated (S-1)	SSL-1	SSL-1	SSL-1
Manned Evacuated (S-2)	SSL-1	SSL-2	SSL-2
Unmanned (S-3)	SSL-1	SSL-2	SSL-3

Sumber : API RP2A – LRFD



Gambar 2. Grafik PDF R dan S normal

Nilai rata-rata dan deviasi standar dari $g(R,S)$ adalah :

$$\mu_G = \mu_R - \mu_S$$

$$\sigma_G^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2$$

Sehingga angka kehandalan menjadi :

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2)$$

dan probabilitas kegagalan (P_f) adalah :

$$\begin{aligned} P_f &= \int_{-\infty}^0 f_G(g) dg \\ &= \Phi\left(\frac{0 - \mu_G}{\sigma_G}\right) - \Phi\left(\frac{-\infty - \mu_G}{\sigma_G}\right) \\ &= \Phi\left(\frac{-\mu_R + \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right) - 0 \\ &= 1 - \Phi(\beta) \end{aligned}$$

dimana Φ adalah fungsi probabilitas kumulatif normal standar.

3.2 Approximative probabilistic method (level II)

Metode aproksimasi probabilistik ini dilakukan dengan pendekatan FOSM (*First Order Second moment*). Metode ini memungkinkan peninjauan terhadap semua variabel acak dengan fungsi distribusi yang berbeda (normal, lognormal, Tipe I, Tipe II, dan

seterusnya) dan fungsi unjuk kerja $g(R,S)$ yang sedikit non linier, sehingga akan didapatkan hasil yang lebih akurat.

Didefinisikan fungsi unjuk kerja atau fungsi keadaan :

$$g(X) = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$$

dimana : $X = X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, vektor keadaan dasar variabel sistem

$g(X)$ = menyatakan unjuk kerja atau keadaan sistem.

Limit state sistem dinyatakan sebagai $g(X) = 0$, [$g(X) > 0$] dinyatakan sebagai *safe state* dan [$g(X) < 0$] sebagai *failure state*. Secara geometrik persamaan keadaan batas $g(X) = 0$ adalah permukaan berdimensi- n disebut “permukaan kegagalan”.

Jika PDF bersama X_1, X_2, \dots, X_n adalah $f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ yaitu probabilitas keadaan aman (*safe state*), maka :

$$P_S = \iint_{g(x) > 0} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1, dX_2, \dots, dX_n$$

$$\text{singkatnya : } P_S = \int_{g(x) > 0} f_X(x) dx$$

dan probabilitas kegagalan (*failure state*) :

$$P_f = \int_{g(x) < 0} f_X(x) dx$$

Variabel tereduksi tak berkorelasi (Freudenthal, 1956):

$$X'_i = \frac{X - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Persamaan keadaan batas :

$$g(X) = \sigma_X X' - \sigma_Y Y' + \mu_X + \mu_Y = 0 \quad (3)$$

3.3 Interpretasi orde pertama

Suatu fungsi unjuk kerja $g(X)$ dapat dikembangkan dalam deret Taylor dititik X^* , dimana $g(X^*)=0$, yaitu :

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) + \sum_{i=1}^n (X_i - X_i^*) \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_* + \dots$$

dimana turunan dievaluasi di $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, dan $g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0$, sehingga :

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = \sum_{i=1}^n (X_i - X_i^*) \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_* + \dots$$

dimana :

$$X_i - X_i^* = (\sigma_{Xi} X'_i + \mu_{Xi}) - (\sigma_{Xi} X'_{i^*} + \mu_{Xi}) \\ = \sigma_{Xi} (X'_i - X'_{i^*})$$

$$\text{dan} \quad \frac{\partial g}{\partial X_i} = \frac{\partial g}{\partial X'_i} \left(\frac{\partial X'_i}{\partial X_i} \right) = \frac{1}{\sigma_{Xi}} \frac{\partial g}{\partial X'_i}$$

Dalam pendekatan orde pertama, dengan menghilangkan deret diatas deret pertama, nilai rata-rata dari fungsi $g(X)$ adalah :

$$\mu_g \approx - \sum_{i=1}^n X'_{i^*} \left(\frac{\partial g}{\partial X'_i} \right)_* \quad (4)$$

dan varian pendekatan orde pertama untuk variabel yang tak berkorelasi :

$$\sigma_g \approx \sum_{i=1}^n \sigma^2_{Xi} \left(\frac{\partial g}{\partial X'_i} \right)_*^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X'_i} \right)_*^2 \quad (5)$$

Dari persamaan (4) dan (5), didapat rasio :

$$\frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{- \sum_i X'_{i^*} \left(\frac{\partial g}{\partial X'_i} \right)_*}{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial g}{\partial X'_i} \right)_*^2}} \quad (6)$$

Dimana rasio μ_g/σ_g merupakan angka kehandalan :

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (7)$$

3.4 Distribusi normal ekivalen

Jika distribusi probabilitas variabel acak X_1, X_2, \dots, X_n tidak berdistribusi normal, probabilitas kegagalan atau kehandalan dapat dievaluasi dengan :

$$P_s = \int_{g(x)>0} f_X(x) dx \quad \text{dan} \quad P_f = \int_{g(x)<0} f_X(x) dx$$

untuk kasus fungsi-fungsi unjuk kerja linier,

$$g(X) = a_0 + \sum a_i X_i$$

Namun demikian, P_s juga dapat dievaluasi dengan distribusi normal ekivalen [Paloheimo, 1974; Rackwitz 1976]. Secara teoritis distribusi normal ekivalen tersebut diperoleh melalui transformasi Rosenblatt [Rosenblatt, 1952]. Dengan distribusi normal ekivalen tersebut, perhitungan P_s tersebut caranya sama seperti untuk variabel normal.

Untuk variabel individual, distribusi normal ekivalen untuk variabel non-normal dapat diperoleh sedemikian sehingga probabilitas kumulatif sebagai ordinat kerapatan probabilitas dari distribusi normal sama dengan probabilitas kumulatif untuk distribusi nonnormal pada titik yang tepat, X_i^* , pada permukaan kegagalan.

Probabilitas kumulatif pada titik kegagalan x_i^* adalah :

$$\Phi \left(\frac{X_i^* - \mu_{Xi}^N}{\sigma_{Xi}^N} \right) = F_{Xi}(X_i^*) \quad (8)$$

dimana :

$\mu_{Xi}^N, \sigma_{Xi}^N$ = nilai rata-rata dan deviasi standar distribusi normal ekivalen X_i

$F_{Xi}(X_i^*)$ = CDF asli X_i yang dievaluasi di X_i^*

$\Phi(-)$ = CDF distribusi normal standar

Persamaan (7) diatas sama dengan :

$$\mu_{Xi}^N = X_i^* - \sigma_{Xi}^N \cdot \Phi^{-1}[F_{Xi}(X_i^*)] \quad (9)$$

Ordinat kerapatan probabilitas di x_i^* adalah :

$$\frac{1}{\sigma_{Xi}^N} \phi \left(\frac{X_i^* - \mu_{Xi}^N}{\sigma_{Xi}^N} \right) = f_{Xi}(X_i^*)$$

dimana : $\phi(-)$ = PDF distribusi normal standar
Sehingga didapat :

$$\sigma_{Xi}^N = \frac{\phi \left\{ \Phi^{-1}[F_{Xi}(X_i^*)] \right\}}{f_{Xi}(X_i^*)} \quad (10)$$

untuk kasus fungsi unjuk kerja linier, arah cosinus adalah :

$$\alpha_i = \frac{a_i}{\sqrt{\sum_i a_i^2}} \quad (11)$$

Maka, angka kehandalan menjadi :

$$\beta = \frac{a_0 + \sum_i a_i \mu_{Xi}}{\sqrt{\sum_i (a_i \sigma_{Xi})^2}} \quad (12)$$

Maka probabilitas kehandalan P_s , dinyatakan dalam :

$$P_s = \Phi(\beta) \quad (13)$$

dimana notasi N menyatakan statistik untuk distribusi normal ekuivalen, dan titik kegagalan adalah :

$$X_i^* = \sigma_{Xi}^N \cdot X_i' + \mu_{Xi}^N = -\alpha_i \beta \sigma_{Xi}^N + \mu_{Xi}^N \quad (14)$$

4. Studi Kasus

4.1 Data anjungan

Struktur anjungan lepas pantai tipe *brace monopod* yang digunakan sebagai sampel dalam penelitian adalah Lita-A well Platform yang berlokasi di area selatan CNOOC *field* yang berada di sebelah tenggara pulau Sumatera dengan koordinat 106° 13' 03.38" E, 5° 29' 07.49" S. Lita-A Well Platform diinstalasi pada tahun 1990 dengan kedalaman air 124 ft dan dimensi *deck* 50' x 30' dan 3 buah *conductor*.

Analisa struktur dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SACS. Perhitungan dilakukan dengan perlakuan struktur dan tiang pancang sebagai sistem linier tetapi sifat tanah sebagai non-linier. Model elemen hingga struktur dibuat dengan menggunakan elemen balok yang tersedia dalam perangkat lunak SACS. Model elemen hingga struktur tersebut dapat dilihat pada **Gambar 3**.

Tabel 3. Elevasi muka air dan mudline

Elevasi Muka Air	Ekstrim ($T_R = 100$ thn)	Operasional ($T_R = 1$ thn)
LAT	-0.8 ft	-0.8 ft
MLW	0.0 ft	0.0 ft
MSL	+1.3 ft	+1.3 ft
HAT	+3.8 ft	+3.8 ft
Storm Tide	0.5 ft	0.0 ft
Total Tide	4.3 ft	3.2 ft
Mudline	-124 ft	-124 ft

4.2 Data dan beban lingkungan

Data lingkungan pada lokasi anjungan didapat dari hasil survey lapangan yang dilakukan sebelumnya. Data lingkungan tersebut disajikan dalam bentuk **Tabel 3**.

Tabel 4. Data gelombang maksimum

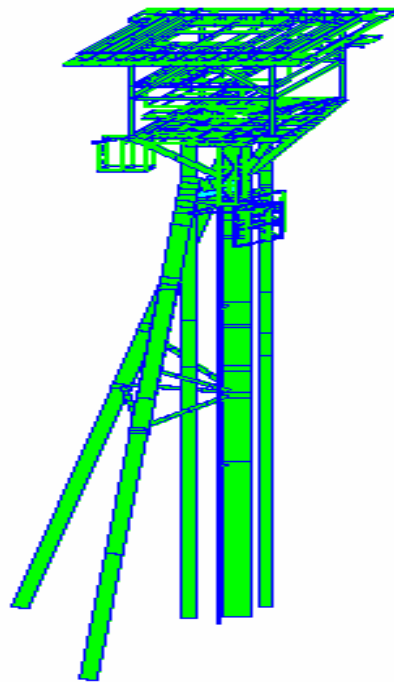
Parameter	Ekstrim ($T_R = 100$ thn)	Operasional ($T_R = 1$ thn)
Tinggi Gelombang (H)	33.5 ft	15.0 ft
Periode Gelombang (T)	10.0 sec	7.1 sec

Tabel 5. Data kecepatan angin

Parameter	Ekstrim ($T_R = 100$ thn)	Operasional ($T_R = 1$ thn)
Kecepatan Angin	62.52 knot	54.75 knot

Tabel 6. Data kecepatan arus

Kedalaman (ft)	Ekstrim ($T_R = 100$ thn)	Operasional ($T_R = 1$ thn)
0.0	5.3 fps	4.00 fps
12.4	5.1 fps	3.87 fps
24.8	5.0 fps	3.74 fps
37.2	4.9 fps	3.61 fps
49.6	4.7 fps	3.48 fps
62.0	4.6 fps	3.35 fps
74.4	4.5 fps	3.22 fps
86.8	4.3 fps	3.09 fps
99.2	4.2 fps	2.96 fps
111.6	4.1 fps	2.83 fps
124.0	4.0 fps	2.70 fps



Gambar 3. Model 3 dimensi lita-A well platform

Gaya akibat gelombang dan arus dihitung oleh modul SEASTATE yang ada dalam software SACS berdasarkan model hidrodinamika. Beban lingkungan diperhitungkan dari 8 (delapan) arah pada kondisi operasional dan kondisi ekstrim. Kecepatan arus ditambahkan kepada kecepatan partikel air akibat gelombang untuk menghitung gaya akibat gelombang dan arus. Gaya akibat angin diperhitungkan untuk angin 1-menit pada kondisi operasional dan kondisi ekstrim. Harga koefisien gaya seret C_D dan koefisien penambahan massa C_M diambil sesuai dengan standard API, yaitu sebesar 0,65 dan 1,6 untuk permukaan yang halus dan sebesar 1,05 dan 1,2 untuk permukaan yang kasar. Elemen struktur yang terletak di bawah MSL dianggap sebagai struktur dengan permukaan kasar. Gaya gelombang dihitung dengan menggunakan teori gelombang Stoke 5th yang tersedia dalam software SACS.

4.3 Analisis *pushed over*

Analisis *static pushed over* dari struktur anjungan lepas pantai yang ditinjau dilakukan untuk mengetahui elemen struktur yang paling kritis yaitu yang lebih dulu mencapai kondisi plastis dan mengalami keruntuhan jika struktur diberi beban berlebih. Analisis *static pushed over* ini dilakukan dengan menggunakan software SACS (*Structural Analysis Computer System*).

Analisis *static pushed over* dilakukan dengan cara melakukan penambahan beban secara bertahap sampai struktur mengalami keruntuhan. Analisis dilakukan terhadap masing-masing arah beban lingkungan, kemudian hasilnya dipilih berdasarkan arah yang paling kritis dengan nilai RSR (*Reserve Strength Ratio*) yang terkecil.

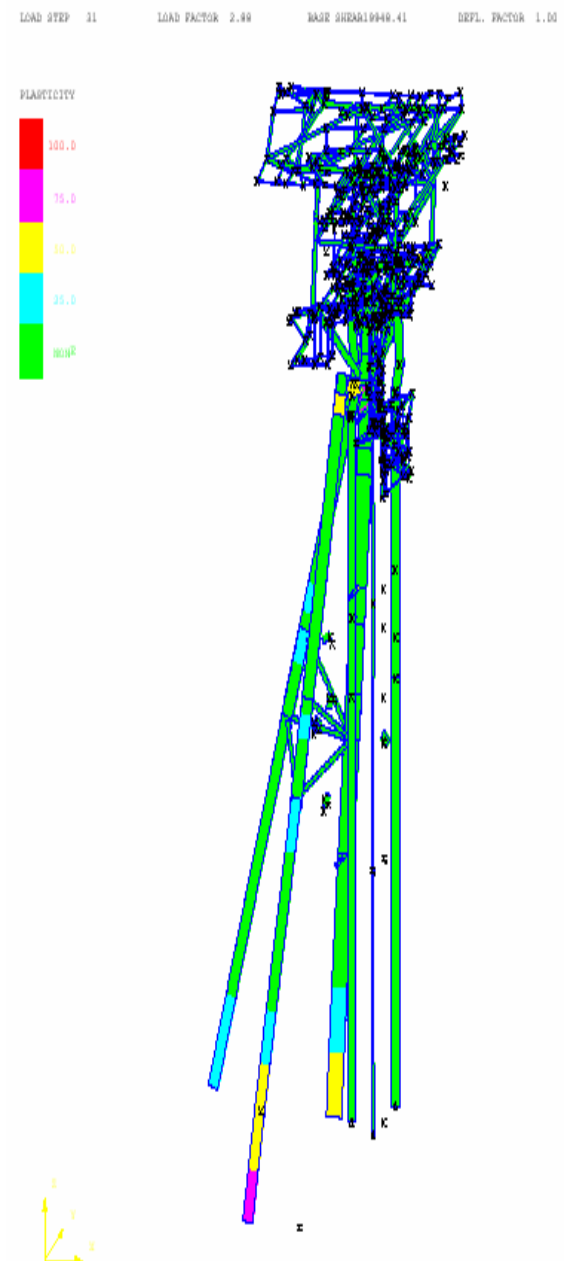
Member atau elemen dari struktur yang paling kritis digunakan sebagai acuan untuk mencari angka kehandalan dan menghitung faktor beban lingkungan. Hasil dari analisis *static pushed over* memperlihatkan member yang paling kritis adalah member 103 – 153 dengan $RSR = 2.88$ (Dari arah 0°) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**.

4.4 Perhitungan angka kehandalan

Untuk perhitungan faktor beban, digunakan data statistik untuk tahanan, beban mati dan beban hidup berdasarkan rekomendasi dari API RP2A – LRFD dengan pertimbangan sifat probabilitas untuk komponen tahanan, beban mati dan beban hidup sama untuk setiap kondisi lingkungan perairan. Sedangkan untuk komponen beban lingkungan, dilakukan perhitungan untuk mendapatkan perilaku statistik dari lokasi lokasi perairan yang ditinjau.

Perilaku statistik dari lingkungan perairan yang ditinjau diwakili oleh data gelombang, dengan asumsi bahwa parameter beban lingkungan yang lain seperti angin dan arus memiliki hubungan yang linier dan karakteristik probabilitas yang sama.

Data yang digunakan untuk menentukan jenis distribusi probabilitas, Covariance dan bias dari beban lingkungan adalah data tinggi gelombang signifikan maksimum selama 16 tahun seperti yang terlihat dalam **Tabel 7**.



Gambar 4. Hasil analisis *static pushed over* dari arah yang paling kritis (0°)

Tabel 7. Tinggi gelombang signifikan maksimum (m)

Thn	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des
1986	2.90	1.28	1.18	0.76	0.63	0.85	0.83	0.76	0.67	1.40	1.86	0.91
1987	2.74	1.49	0.91	0.67	0.91	1.00	0.64	0.76	0.54	0.69	1.08	1.73
1988	1.00	1.00	1.28	1.00	0.54	0.69	0.54	0.52	0.75	2.42	1.38	2.27
1989	1.09	1.00	1.73	1.08	0.63	1.00	0.91	1.38	0.53	1.90	1.86	1.18
1990	3.81	1.18	1.18	1.00	1.38	0.76	0.83	1.49	0.76	1.18	1.73	1.73
1991	2.27	1.18	0.70	1.28	0.71	0.64	0.78	0.69	0.67	1.22	1.01	1.73
1992	2.27	3.25	1.08	1.49	1.18	1.08	0.81	0.70	1.40	1.00	2.27	2.58
1993	3.81	1.28	1.38	0.91	0.91	0.83	0.58	1.00	0.61	0.73	1.18	2.27
1994	1.86	1.28	1.28	0.98	0.58	0.69	0.68	0.91	0.54	1.28	0.86	2.58
1995	2.27	1.49	1.61	2.13	0.67	0.76	1.09	1.00	1.00	1.09	1.08	2.27
1996	1.86	2.27	1.28	1.49	0.71	0.91	0.92	0.91	0.76	1.45	2.42	2.58
1997	1.86	1.28	0.95	1.00	0.71	0.76	0.91	1.18	0.76	0.98	1.49	2.13
1998	1.86	1.86	0.89	1.37	0.86	0.91	0.76	1.18	0.76	1.73	3.07	3.07
1999	2.74	1.99	1.73	3.07	1.73	1.38	1.61	0.91	1.49	2.42	3.81	2.58
2000	2.42	1.73	1.99	2.04	0.73	0.86	1.09	1.18	0.78	2.66	2.90	2.83
2001	3.07	4.21	1.18	2.66	3.49	2.71	3.01	1.14	1.76	1.44	1.61	-

Kemudian dilakukan perhitungan sebagai berikut :

Tabel 8. Perhitungan parameter statistik

No.	H_{\max} (m)	Log (H_{\max})
1	2.90	0.46
2	2.74	0.44
3	2.42	0.38
4	1.90	0.28
5	3.81	0.58
6	2.27	0.36
7	3.25	0.51
8	3.81	0.58
9	2.58	0.41
10	2.27	0.36
11	2.58	0.41
12	2.13	0.33
13	3.07	0.49
14	3.81	0.58
15	2.90	0.46
16	4.21	0.62
S	1.71	7.25
m	2.92	0.45
s	0.45	0.01
s	0.67	0.03
Cs	0.03	0.52

Tabel 9. Perhitungan tinggi gelombang periode ulang dengan empat metode

No. (m)	H_{\max} (m)	$m/(N+1)$	T_r	Normal	Log-normal		Log-Pearson		Gumbel	
					K_T	H_{\max} (m)	K_T	H_{\max} (m)	K_T	H_{\max} (m)
1	4.21	0.059	17.00	4.06494	1.77883	4.10852	1.84520	4.15303	1.73637	4.08005
2	3.81	0.118	8.50	3.81152	0.97478	3.56932	1.08094	3.64051	1.17087	3.70082
3	3.81	0.176	5.67	3.63855	0.50444	3.25390	0.63387	3.34070	0.82837	3.47114
4	3.81	0.235	4.25	3.49948	0.17073	3.03011	0.31667	3.12799	0.57616	3.30200
5	3.25	0.294	3.40	3.37869	-0.08812	2.85653	0.07063	2.96299	0.37247	3.16541
6	3.07	0.353	2.83	3.26871	-0.29961	2.71470	-0.13039	2.82818	0.19852	3.04875
7	2.90	0.412	2.43	3.16518	-0.47843	2.59479	-0.30036	2.71420	0.04407	2.94518
8	2.90	0.471	2.13	3.06511	-0.63332	2.49091	-0.44759	2.61547	-0.09722	2.85043
9	2.74	0.529	1.89	2.96614	-0.76995	2.39929	-0.57746	2.52838	-0.22976	2.76154
10	2.58	0.588	1.70	2.86607	-0.89217	2.31733	-0.69363	2.45047	-0.35699	2.67622
11	2.58	0.647	1.55	2.76254	-1.00273	2.24319	-0.79872	2.38000	-0.48195	2.59242
12	2.42	0.706	1.42	2.65256	-1.10366	2.17550	-0.89466	2.31566	-0.60780	2.50803
13	2.27	0.765	1.31	2.53177	-1.19651	2.11324	-0.98291	2.25648	-0.73846	2.42041
14	2.27	0.824	1.21	2.39270	-1.28248	2.05559	-1.06462	2.20168	-0.87993	2.32554
15	2.13	0.882	1.13	2.21973	-1.36251	2.00192	-1.14070	2.15067	-1.04379	2.21565
16	1.90	0.941	1.06	1.96631	-1.43738	1.95171	-1.21186	2.10295	-1.26267	2.06887

Tabel 10. Perhitungan nilai rata-rata error relatif

H_{\max} (m)					$(H_{\max}(\text{teori}) - H_{\max}(\text{data}))^2$			
Data	Normal	Log-Normal	Log-Pearson	Gumbel	Normal	Log-Normal	Log-Pearson	Gumbel
4.21	4.06494	4.10852	4.15303	4.08005	0.02104	0.01030	0.00325	0.01689
3.81	3.81152	3.56932	3.64051	3.70082	0.00000	0.05793	0.02873	0.01192
3.81	3.63855	3.25390	3.34070	3.47114	0.02940	0.30924	0.22024	0.11483
3.81	3.49948	3.03011	3.12799	3.30200	0.09642	0.60822	0.46514	0.25806
3.25	3.37869	2.85653	2.96299	3.16541	0.01656	0.15482	0.08237	0.00716
3.07	3.26871	2.71470	2.82818	3.04875	0.03948	0.12624	0.05848	0.00045
2.90	3.16518	2.59479	2.71420	2.94518	0.07032	0.09315	0.03452	0.00204
2.90	3.06511	2.49091	2.61547	2.85043	0.02726	0.16735	0.08096	0.00246
2.74	2.96614	2.39929	2.52838	2.76154	0.05114	0.11608	0.04478	0.00046
2.58	2.86607	2.31733	2.45047	2.67622	0.08184	0.06900	0.01678	0.00926
2.58	2.76254	2.24319	2.38000	2.59242	0.03332	0.11344	0.04000	0.00015
2.42	2.65256	2.17550	2.31566	2.50803	0.05409	0.05978	0.01089	0.00775
2.27	2.53177	2.11324	2.25648	2.42041	0.06852	0.02457	0.00018	0.02262
2.27	2.39270	2.05559	2.20168	2.32554	0.01506	0.04597	0.00467	0.00308
2.13	2.21973	2.00192	2.15067	2.21565	0.00805	0.01641	0.00043	0.00734
1.90	1.96631	1.95171	2.10295	2.06887	0.00440	0.00267	0.04119	0.02852
Rata-rata error relatif					0.03856	0.12345	0.07079	0.03081
					0.19636	0.35135	0.26606	0.17553

Dari **Tabel 10**, didapat rata-rata error relatif yang paling kecil dihasilkan dari distribusi gumbel, yaitu 0.17553. Sehingga fungsi distribusi probabilitas yang dipilih untuk beban gelombang adalah distribusi Gumbel (Ekstrim tipe I)

Dari perhitungan diperoleh :

- Untuk Kondisi Operating (periode ulang 1 tahun)
COV = 0.225
Bias = 0.903
- Untuk Kondisi Storm (periode ulang 100 tahun)
COV = 0.127
Bias = 0.952

Sehingga parameter statistik yang digunakan dalam menghitung angka keandalan dan kombinasi pembebanan adalah :

Tabel 11. Parameter statistik

	DL1	DL2	LL	Resistance	W _O	W _E
Distribution	Normal	Normal	Gamma	Lognormal	Type I	
COV	0.06	0.1	0.14	0.13	0.225	0.127
Bias	1.0	1.0	1.0	1.0	0.903	0.952

Sehingga berdasarkan parameter statistik dan beban nominal yang bekerja pada member yang paling kritis (103-151) didapatkan angka keandalan sebagai berikut :

- Kondisi Operating : $\beta = 4.82$
- Kondisi Storm : $\beta = 5.49$

4.5 Perhitungan faktor beban lingkungan

Dalam bukunya yang berjudul *Risk Based Oceanographic and Earthquake Load and Resistance Factor Criteria for Design and Requalification of Platforms Offshore Indonesia* Robert Bea [1998] mengemukakan bahwa angka keandalan yang optimal untuk struktur anjungan lepas pantai di Indonesia adalah $\beta = 2.9$. Sehingga dari perhitungan sebelumnya dapat disimpulkan bahwa struktur Lita-A Well Platform memiliki angka keandalan yang berlebih.

Untuk itu perlu dilakukan penyesuaian parameter desain yang digunakan dalam hal ini faktor beban lingkungan sehingga didapatkan struktur yang optimal dan dapat menghindari pemborosan.

Dalam studi kasus ini, dilakukan perhitungan kombinasi pembebanan berdasarkan angka keandalan yang sama dengan yang didapat dari perhitungan sebelumnya dengan hasil sebagai berikut :

- Kondisi Operating

Kombinasi Pembebanan :

$$1.3 \text{ DL1} + 1.3 \text{ DL2} + 1.5 \text{ LL} + 1.03 \text{ W}_0$$

Rekomendasi API RP2A – LRFD :

$$1.3 \text{ DL1} + 1.3 \text{ DL2} + 1.5 \text{ LL} + 1.25 \text{ W}_0$$

- Kondisi Storm

Kombinasi Pembebanan :

$$1.1 \text{ DL1} + 1.1 \text{ DL2} + 1.1 \text{ LL} + 1.17 \text{ W}_E$$

Rekomendasi API RP2A – LRFD :

$$1.1 \text{ DL1} + 1.1 \text{ DL2} + 1.1 \text{ LL} + 1.35 \text{ W}$$

5. Kesimpulan

Berdasarkan kondisi lingkungan yang ditinjau dan dengan target angka keandalan yang sama dengan angka keandalan yang diperoleh dengan format desain API RP2A – LRFD, yaitu 4,82 untuk kondisi *operating* dan 5.49 untuk kondisi *storm*, didapatkan faktor beban lingkungan yang lebih kecil dari faktor beban lingkungan yang ditetapkan dalam API RP2A – LRFD. Hal ini terjadi karena kondisi perairan di daerah yang ditinjau tidak sama dengan kondisi perairan di Teluk Mexico. Karena itu, akan dihasilkan struktur dengan angka keandalan yang berlebih apabila struktur yang akan ditempatkan di daerah yang ditinjau dirancang dengan menggunakan format API RP2A - WSD maupun API RP2A – LRFD.

Angka keandalan yang diperoleh untuk kondisi *operating* dan untuk kondisi *storm* untuk struktur anjungan lepas pantai pada umumnya berbeda. Perancangan struktur anjungan lepas pantai dapat lebih optimum lagi apabila dilakukan berdasarkan target angka keandalan untuk kondisi *operating* dan kondisi *storm* yang sama. Karena itu, perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai angka keandalan minimum yang sesuai dengan kondisi di Indonesia sehingga rancangan yang didapat tidak berlebih.

Daftar Pustaka

- American Petroleum Institute, 1993, “*API Recommended Practice 2A – WSD (API RP2A – WSD), First Edition*”.
- American Petroleum Institute, 1997, “*API Recommended Practice 2A – LRFD (API RP2A – LRFD), Supplement I*”.
- Ang, Alfredo H-S., Tang, W.H., 1975, “*Probability Concepts in Engineering Planning and Design Volume I*”, John Wiley & Sons Inc.

- Bea, R., 1998, "*Risk Based Oceanographic and Earthquake Load and Resistance Factor Criteria for Design and Requalification of Platforms Offshore Indonesia*", University of Barkeley, California
- Ellingwood, B., McGregor, J.G., Galambos T.V., Cornell, C.A., 1982, "*Probability Based Load Criteria : Load Factor and Load Combination*", Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. ST 5, pp. 978-9
- Faber, M.H., 2003, "*Risk and Safety in Civil, Surveying and Environmental Engineering*", Swiss Federal Institute of Technology.
- Hsu, Teng H., 1984, "*Applied Offshore Structural Engineering: Practical Design Methods, Formulas, and Data*", Gulf Publishing Company, Houston.
- Lembaga Afiliasi Penelitian dan Industri – Institut Teknologi Bandung, 2003, "*Computation of Monthly Individual Wave Distribution for Southeast Sumatera*"
- Pradyana, G., Surahman, A., Idris, K., Rohayati, Y., 1999, "*Standard for Offshore Structure in Indonesia*", VI-1 Strategic Research Report, Institut Teknologi Bandung.

